

# Der Zusammenhang von Fitness, kognitiver Leistungsfähigkeit und Gehirnzustand im Schulkindalter

## Konsequenzen für die schulische Leistungsfähigkeit

Charles H. Hillman<sup>1</sup> und Nadja Schott<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Illinois at Urbana-Champaign, <sup>2</sup>Universität Stuttgart

**Zusammenfassung.** Es findet sich eine zunehmende Zahl an Studien, die den positiven Zusammenhang zwischen physischer Aktivität und kardiovaskulärer Fitness einerseits und kognitiven Fähigkeiten, geistiger Gesundheit und schulischen Leistungen andererseits thematisiert. In diesem Review werden Ergebnisse beschrieben, die eine Beziehung zwischen Fitness und Kognition bei Kindern herstellen. Dadurch wird die Annahme unterstützt, dass gesundheitlich relevante Verhaltensweisen einen Einfluss auf bestimmte Hirngewebe und neuronale Prozesse haben, die für akademische Leistungen verantwortlich sind. Des Weiteren werden Forschungsarbeiten vorgestellt, die kurzfristige Effekte einzelner Einheiten körperlicher Aktivität auf die kognitive und geistige Gesundheit sowie die schulische Leistung untersucht haben. Diese Ergebnisse haben Auswirkungen auf die kognitive Gesundheit und das Lernen sowie die generelle Atmosphäre im Klassenzimmer. Die Auswirkungen dieser Forschungsergebnisse zeigen sich während des Reifungsprozesses in einer Verbesserung der effizienten Funktionsfähigkeit als auch der schulischen Leistungsfähigkeit, so dass daraus eine Vielzahl an Vorteilen für die gesamte Lebensspanne entsteht. In einer Zeit, in der Kinder immer mehr sitzen und unfit werden, sind solche Daten wichtig, um das gesellschaftliche Gesundheitsproblem rückgängig zu machen.

Schlüsselwörter: Training, neuronale Bildgebung, Lernen

Fitness and cognitive performance in childhood

**Abstract.** There is increasing literature that addresses the beneficial relationship of physical activity and cardiorespiratory fitness on aspects of cognitive and brain health in relation to scholastic achievement. In this review, findings are described that relate fitness to cognition in children, providing support for the influence of health behaviors on specific brain tissue and neural processes that support academic achievement. In addition, research examining the transient benefits resulting from participation in single bouts of physical activity on cognitive and brain health and scholastic achievement are described. Such findings have implications for cognitive health and learning, and the overall classroom climate. The implications of this research stand to improve effective functioning and scholastic achievement of individuals during maturation, which might provide a cascade of benefits as individuals progress through the lifespan. In an era in which children are becoming increasingly sedentary and unfit, such data are important toward reversing this public health concern.

Key words: exercise, neuroimaging, learning

Weltweit sind rasante Abnahmen der körperlichen Aktivität zu beobachten. Aktuelle Schätzungen gehen davon aus, dass in den nächsten Jahrzehnten Inaktivitätsraten in nahezu allen industrialisierten Staaten steigen werden (Ng & Popkin, 2012). Solch ein Trend ist möglicherweise das Ergebnis des Einfallsreichtums der heutigen Zeit: Technische Errungenschaften haben körperliche Aktivität aus vielen Facetten unseres Lebens (Verkehr, Arbeit, Freizeit) verbannt (Vaynman & Gomez-Pinilla, 2006). Die überwiegend sitzende

Lebensweise hat weitreichende Konsequenzen nicht nur für unser Gesundheitssystem und unsere körperliche Gesundheit, sondern auch für die kognitive Gesundheit und die des Gehirns (Hillman, Erickson & Kramer, 2008). Unglücklicherweise führen die Auswirkungen eines inaktiven Lebensstiles auch bei Kindern zu Gesundheitsschäden und Einschränkungen im Wohlbefinden. So zeigen aktuelle Schätzungen, dass die jüngeren Generationen zum ersten Mal in der Geschichte der Vereinigten Staaten ein kürzeres

und weniger gesundes Leben im Vergleich zu ihren Eltern haben könnten (Fontaine, Redden, Wang, Westfall & Allison, 2003; Olshansky et al., 2005). Trotz der immensen Zahl an Studien, die zeigen, dass eine Zunahme in körperlicher Aktivität (oder eine bessere Fitness) in einem positiven Zusammenhang (oder zumindest keinem negativen) mit der schulischen Leistungsfähigkeit steht (Hillman et al., 2008), werden diese Trends durch die amerikanischen Schulen noch verschärft. So haben Schulen, die von 55.5 Millionen Kindern im Alter von 5 bis 17 Jahren besucht werden (U.S. National Center for Education Statistics, 2011), Richtlinien zur Reduktion von körperlicher Aktivität eingeführt, um die schulische Leistungsfähigkeit zu erhöhen. Der aktuelle Forschungsstand zeigt jedoch nicht nur, dass körperliche Aktivität die schulische Leistungsfähigkeit nicht negativ beeinflusst. Vielmehr übertreffen aktive und fitte Kinder die weniger aktiven und fitten Gleichaltrigen im Klassenzimmer, was auf einen Zusammenhang zwischen körperlicher Aktivität und kognitiver Gehirngesundheit schließen lässt (Hillman et al., 2008). Aus diesem Grund wurden verstärkt Bemühungen angestellt, die zugrundeliegenden neuronalen Mechanismen zu verstehen, die den Zusammenhang von körperlicher Aktivität und schulischer Leistungsfähigkeit bei Schulkindern besser erklären können. Dies geschieht mit dem Ziel, auch die Faktoren besser identifizieren zu können, die über die Lebensspanne hinweg zu einer Verbesserung der kognitiven Gesundheit und effektiveren Funktionsfähigkeit führen können. Mit dem vorliegenden Beitrag soll ein Forschungsprogramm beschrieben werden, das bildgebende Verfahren nutzt, um diejenigen Gehirnstrukturen und -funktionen zu untersuchen, die mit körperlicher Aktivität und aerober Ausdauerleistungsfähigkeit in Verbindung gebracht werden können. Es werden die Studien vorgestellt, die den Zusammenhang von akuter sowie chronischer körperlicher Aktivität und kognitiver Gesundheit und Gehirngesundheit betrachten, um so diejenigen Lebensstilfaktoren herauszufiltern, die den Lernprozess und die schulische Leistungsfähigkeit bei Kindern unterstützen.

## Aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit und neurokognitive Funktionen

Zahlreiche Reviews sowie Meta-Analysen haben in den letzten drei Jahrzehnten das Feld der neurokognitiven Bewegungswissenschaften geprägt. Erst kürzlich wurde auch die Gruppe der Kinder in der Literatur berücksichtigt. Sibley und Etnier (2003) finden in ihrer Meta-Analyse einen positiven Zusammenhang zwischen körperlicher Aktivität und kognitiver Leistungsfähigkeit bei Schulkindern im Alter von 4 bis 18 Jahren, was vermuten lässt, dass körperliche Aktivität

relevant für die kognitiven Funktionen in der Entwicklung ist. Die Teilnahme an körperlichen Aktivitäten wurde für acht verschiedene Kategorien der kognitiven Leistungsfähigkeit untersucht (u. a. Wahrnehmung, Intelligenzquotient, verbale Fähigkeiten, Tests zu mathematischen Fähigkeiten, Gedächtnis, Entwicklungsstufe bzw. Schulreife). Bis auf das Gedächtnis konnten die Autoren einen positiven Effekt körperlicher Aktivität für alle weiteren kognitiven Funktionen bestätigen (Sibley & Etnier, 2003). Dieses Review ist deshalb von besonderer Bedeutung, da es dazu beigetragen hat, die Bedeutung körperlicher Aktivität für die kognitiven Funktionen im Entwicklungsprozess anzuerkennen. Es hat jedoch auch gezeigt, dass mehr Studien benötigt werden, um die vielschichtigen Mechanismen der Beziehung von körperlicher Aktivität und Gehirngesundheit zu verstehen.

Weitere, zumeist querschnittlich angelegte Studien haben sich insbesondere mit dem Einfluss der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit auf die kognitive Leistungsfähigkeit und das Gehirn in der präadoleszenten Entwicklung beschäftigt. In einer ersten Studie wurden in unserem Labor 7 bis 12-jährige Kinder mit der Papier-Bleistift-Version des Stroop-Tests sowie dem Fitnessgram (Feldtest zur Überprüfung der Fitness) untersucht (Buck, Hillman & Castelli, 2008). Der Stroop-Test dient zur Überprüfung der kognitiven Kontrolle (Auswahl an zielgerichteten Vorgängen, die die Selektion, Terminierung und Koordination von Verarbeitungsprozessen, die in Wahrnehmung, Gedächtnis und Handlung involviert sind, aufeinander abstimmt). Es zeigte sich, dass alle drei Bedingungen im Stroop-Test (neutral, kongruent, inkongruent) mit einer besseren Leistung im Ausdauerlauf (Anzahl der absolvierten Runden im PACER-Test) einhergingen. Unabhängig von Faktoren wie Alter, Geschlecht und Intelligenz konnten alle Versuchsteilnehmer mit einer höheren Ausdauerleistungsfähigkeit mehr Farben in allen Bedingungen des Stroop-Tests benennen. Diese ersten Befunde deuten darauf hin, dass eine höhere aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit diejenigen kognitiven Prozesse positiv beeinflusst, die der kognitiven Kontrolle während der präadoleszenten Entwicklung zugrunde liegen.

## Fitness und Gehirnstruktur

Die Fortschritte in der Entwicklung der bildgebenden Verfahren haben das Verständnis des Zusammenhangs von aerober Leistungsfähigkeit und Gehirnstruktur und -funktion im letzten Jahrzehnt rasant fortschreiten lassen. Eine wachsende Zahl querschnittlicher Studien haben bei Kindern Unterschiede in Gehirnstruktur und -funktion in Abhängigkeit von der aeroben Fitness zeigen können. Beispielsweise beobachten Chaddock

und ihre Kollegen (2010a, b) einen Zusammenhang zwischen aerober Ausdauerleistungsfähigkeit, Gehirnvolumen, verschiedenen Gedächtnissystemen sowie kognitiver Leistungsfähigkeit. Basierend auf den  $VO_2$ max-Ergebnissen eines entsprechenden Labortests unterteilten Chaddock et al. (2010a) 9 bis 10-jährige Kinder in Gruppen mit geringer oder hoher Fitness. Die Ergebnisse der Magnetresonanztomographie bestätigen ein größeres bilaterales Volumen des Hippocampus für Kinder mit hoher Fitness im Vergleich zu Kindern mit einer geringeren Fitness. Darüber hinaus schnitten Kinder mit hoher Fitness besser in Tests zum relationalen Gedächtnis ab. Bereits in anderen Studien hat sich gezeigt, dass die Leistung in dieser Aufgabe durch den Hippocampus mediiert wird (Cohen & Eichenbaum, 1993; Cohen et al., 1999). Keine Unterschiede zeigten sich allerdings für die Item-Gedächtnisaufgabe, die durch Strukturen außerhalb des Hippocampus unterstützt wird. Schließlich war das hippocampale Volumen positiv mit der Leistung in der relationalen Gedächtnisaufgabe, nicht aber mit der Leistung in der Item-Gedächtnisaufgabe assoziiert. Das bilaterale hippocampale Volumen mediierte wiederum den Zusammenhang zwischen Fitness und relativem Gedächtnis (Chaddock et al., 2010a). Diese Befunde stimmen überein mit Verhaltensdaten zum relationalen Gedächtnis bei präadoleszenten Kindern (Chaddock, Hillman, Buck & Cohen, 2011), mit Ergebnissen aus bildgebenden Verfahren bei älteren Erwachsenen (Erickson et al., 2009), wie auch Ergebnissen aus tierexperimentellen Studien, die Trainingseffekte auf Zellproliferation (van Praag, Christie, Sejnowski & Gage, 1999) und Zellüberlebensrate (Neeper, Gomez-Pinilla, Choi & Cotman, 1995) im Hippocampus zeigen konnten.

In einer weiteren Studie wurden ebenfalls fitte mit weniger fitten 9 bis 10-jährigen Kindern verglichen (Chaddock et al., 2010b). Dabei fanden die Autoren unterschiedliche Befunde für die Basalganglien, eine subkortikale Struktur, die am Zusammenspiel von Kognition und willkürlichen Bewegungen beteiligt ist. Sehr fitte Kinder zeigten im Vergleich zu weniger fitten Kindern ein größeres Volumen im dorsalen Striatum (u. a. Nucleus caudatus, Putamen, Globus pallidus), während keine fitness-assoziierten Unterschiede im ventralen Striatum gefunden wurden. Diese Ergebnisse sind aufgrund der Rolle des dorsalen Striatum bei der kognitiven Kontrolle und Entscheidungsprozessen nicht weiter überraschend (Aron, Poldrack & Wise, 2009; Casey, Getz & Galvan, 2008). Immer mehr Forschungsergebnisse zeigen, dass eine bessere Fitness bei Kindern und auch bei Erwachsenen mit einer besseren Kontrolle von Aufmerksamkeit, Gedächtnis und Kognition assoziiert ist (Colcombe & Kramer, 2003; Etnier & Chang, 2009; Hillman et al., 2008). Chaddock und Kollegen (2010b) konnten

weiterhin zeigen, dass sehr fitte Kinder eine wachsende Fähigkeit entwickeln, perzeptuelle Interferenzen, verursacht bei einer Flanker-Aufgabe, zu bewältigen. Diese Aufgabe erfordert eine variable inhibitorische Kontrolle sowie schnelle Entscheidungsprozesse. Darüber hinaus zeigten die Autoren, dass ein höheres hippocampales Volumen mit schnelleren Entscheidungsprozessen verbunden ist. Somit weisen diese Ergebnisse darauf hin, dass das dorsale Striatum an Aspekten höherer kognitiver Funktionen beteiligt ist und dass Fitness die kognitive Kontrolle während präadoleszenter Entwicklung positiv beeinflussen kann.

## Aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit und Gehirnfunktion

Weitere Studien haben angesichts der Unterschiede in der Gehirnstruktur versucht, die fitness-assoziierten Unterschiede in der Gehirnfunktion mit funktionaler Magnetresonanztomographie (fMRT) sowie ereigniskorrelierten Potenzialen (EKPs) zu charakterisieren. Davis und Kollegen (2011) ordneten 20 übergewichtige 7 bis 11-jährige Kinder, die einem überwiegend sitzenden Lebensstil folgten, einer körperlich aktiven Interventionsgruppe bzw. einer nicht aktiven Kontrollgruppe randomisiert zu. Die Interventionsdauer betrug ca. 14 Wochen. Im fMRT-Scanner wurden Daten während einer Anti-Sakkaden-Aufgabe, welche Inhibition und Aufmerksamkeitskontrolle erfordert, erhoben. Im Vergleich zur Kontrollgruppe zeigten die Kinder aus der aktiven Interventionsgruppe eine erhöhte bilaterale Aktivierung des präfrontalen Kortex und eine Abnahme in der bilateralen Aktivierung des posterioren parietalen Kortex (eine Region, die an der Neuorientierung visuell-räumlicher Aufmerksamkeit beteiligt ist; Davis et al., 2011). Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass körperliche Aktivität die kognitive Kontrolle von Aufmerksamkeit und Inhibition möglicherweise verbessern kann. Darüber hinaus werden diejenigen neuronalen Substrate aufgezeigt, die durch die Teilnahme an Angeboten zur körperlichen Aktivität beeinflusst werden können.

Studien mit bildgebenden Verfahren haben den Fokus auf das neuroelektrische System (u. a. EKPs) gelegt, um diejenigen kognitiven Prozesse zu untersuchen, die zwischen Stimuluseinsatz und Antwortausführung auftreten und durch aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit oder einzelne, akute Ausdauerleistungen beeinflusst werden. Verschiedene Studien haben die Amplitude der P3-Komponente der stimulus-abhängigen ereigniskorrelierten Potenziale untersucht, und konnten zeigen, dass sehr fitte präadoleszente Kinder größere EKP-Amplituden und kürzere EKP-Latenzzeiten im Vergleich zu weniger fitten Kindern produzieren

(Hillman, Castelli & Buck, 2005; Hillman, Buck, Themanon, Pontifex & Castelli, 2009a; Pontifex et al., 2011). Heutige Theorien (Context-Updating-Model, Donchin, 1981) besagen, dass die P3 als elektrophysiologisches Korrelat einer ständigen Überprüfung der mentalen Repräsentation der Umwelt im Arbeitsgedächtnis betrachtet wird. Die P3-Amplitude bildet die gebundenen Aufmerksamkeitsressourcen einer Aufgabe ab, wenn diese im Arbeitsgedächtnis verändert wird (Donchin & Coles, 1988). Stimmt der aktuelle Reiz mit dem Modell überein, wird das Modell stabilisiert. Kommt es zum Widerspruch zwischen Reiz und Modell, wird neben notwendigen Verhaltensanpassungen auch das Modell verändert (Updating). Das bedeutet auch, dass die P3 höchst sensibel gegenüber der Größe der stimulusbedingten Aufmerksamkeitsressourcen ist (Polich, 1987; Polich & Heine, 1996).

Die P3-Latenzzeit wird üblicherweise als Indikator dafür gesehen, wie lange es dauert, einen Reiz zu evaluieren und zu klassifizieren (Duncan-Johnson, 1981; Kutas, McCarthy & Donchin, 1977) und wird damit als Maß für die Reizentdeckung und -evaluation sowie die Zeit für antwortbezogene Prozesse angenommen (Ilan & Polich, 1999; Magliero, Bashore, Coles & Donchin, 1984). Demzufolge sprechen die Studienergebnisse dafür, dass den sehr fitten Kindern größere Aufmerksamkeitsressourcen zur Verfügung stehen und sie schnellere Zeiten bei der Reizklassifizierung im Vergleich zu weniger fitten Kindern erzielen (Hillman et al., 2005, Hillman et al., 2009a). Darüber hinaus zeigt sich, dass sehr fitte Kinder über eine größere Flexibilität in der Zuweisung von Aufmerksamkeitsressourcen verfügen. Dies lässt sich an der größeren Modulation der P3-Amplitude für verschiedene Aufgaben mit unterschiedlichen Belastungen an die kognitive Kontrolle feststellen (Pontifex et al., 2011). Aufgrund der besseren Aufgabenbewältigung der sehr fitten Kinder kann angenommen werden, dass die P3-Komponente die Effektivität des kognitiven Systems, das willkürliche Bewegungen unterstützt, widerspiegelt (Hillman et al., 2009a; Pontifex et al., 2011).

In diesen EKP-Studien wurde der Fokus auch auf Aspekte der Kognition gerichtet, die in Bezug zur Handlungsüberwachung stehen (Hillman et al., 2009a; Pontifex et al., 2011). Hierzu wurden die sogenannte Error-Related Negativity Potentiale (ERN) bei fitten und weniger fitten Kindern untersucht. Die ERN wird bei gemittelten, antwortabhängigen ereigniskorrelierten Potenzialen untersucht und tritt nach einer Reaktion auf, wenn sie von der Person als falsch erkannt wird. Sie spiegelt scheinbar Fehlerdetektion (Gehring, Goss, Coles, Meyer & Donchin, 1993; Holroyd & Coles, 2002), Fehlerkorrektur bzw. Fehlerbewältigung (Botvinick, Braver, Barch, Carter & Cohen, 2001; Yeung, Botvinick & Cohen, 2004) wider. Die ERN-Potentiale haben vermutlich einen einzigen neuronalen Generator

im oder in der Nähe des dorsalen Teils des anterioren cingulären Cortex (Rostral Cingulate Zone) (Carter et al., 1998; Dehaene, Posner & Tucker 1994; Miltner et al., 2003). Sehr fitte Kinder produzieren kleinere ERN-Amplituden bei Aufgaben, die eine schnelle Antwort verlangen (bei der Instruktion wird der Fokus auf die Antwortschnelligkeit gelegt; Hillman et al., 2009a). Sie sind darüber hinaus flexibler in der Zuteilung ihrer Ressourcen bei Aufgaben, die eine variable Handlungsüberwachung benötigen. Dies zeigt sich an den Veränderungen der ERN-Amplitude bei den fitten Kindern. Für die weniger fitten Kinder wird jedoch keine Modulation der ERN registriert (Pontifex et al., 2011).

Die vorgestellten Ergebnisse lassen sich dahingehend zusammenfassen, dass weniger fitte Kinder weniger Aufmerksamkeitsressourcen während der Reizverarbeitung (P3-Amplitude) nutzen, aber eine verstärkte Nutzung derjenigen Ressourcen zeigen, die zur Handlungsüberwachung (ERN-Amplitude) nötig sind. Dagegen stehen fitten Kindern größere Ressourcen für Umweltreize zur Verfügung und sie verlassen sich weniger auf die Handlungsüberwachung (mehr Ressourcen werden nur genutzt, wenn die Aufgabenschwierigkeit steigt). Bei höherer Aufgabenschwierigkeit schlägt die Strategie der weniger fitten Kinder jedoch fehl, da sie bei Bedingungen mit großem Konfliktpotenzial der Aufgabe schlechtere Leistungen erbringen.

## Akute Trainingseffekte auf die neurokognitiven Funktionen

Trotz der spärlichen Literatur im Bereich der kognitiven Neurowissenschaften zu den Effekten akuter Trainingseinheiten bei Schulkindern wurden erst kürzlich einige interessante Befunde berichtet, die den Grundstein für vielversprechende Programme gelegt haben, um schulische Leistungsfähigkeit zu verbessern. Wie aktuellen Meta-Analysen (Lambourne & Tomporowski, 2010; Sibley & Etnier, 2003) und Literaturreviews (Tomporowski, 2003; Tomporowski, Davis, Lambourne, Gregoski & Tkacz, 2008) zu entnehmen ist, können sich bereits einzelne Trainingseinheiten bei Kindern positiv auf verhaltensorientierte Aspekte der Kognition auswirken. Insofern ist das wachsende Interesse an den vorübergehenden Effekten einzelner Trainingseinheiten zur Verbesserung der schulischen Leistungsfähigkeit verständlich. Die meisten Studien zu akuten Trainingseffekten haben sich weniger mit den unterschiedlichen, beeinflussbaren Aspekten der Kognition beschäftigt. Vielmehr stehen die Veränderungen der Kognition als Reaktion auf die Art und Dauer des Trainingsreizes im Untersuchungsmittelpunkt. Insgesamt ist es schwierig einen gemeinsamen Nenner in der Literatur zu akuten Trainingseffekten auf die kog-

nitive Leistungsfähigkeit zu finden, da scheinbar jede Studie unterschiedliche kognitive Aufgaben und Altersgruppen verwendet, was nur wenige Möglichkeiten lässt, umfassende Schlussfolgerungen abzuleiten.

Frühe Studien haben beispielsweise die Effekte einzelner Trainingseinheiten auf kognitive Funktionen mit der Hilfe von Mathematiktests durchgeführt. So führten Kinder der 2. Klasse 2-minütige Tests zum Rechnen sowohl vor (Prätest), wie auch nach 20-, 30-, 40- und 50-minütiger Teilnahme am Sportunterricht und auch nach dem Unterricht (Posttest) durch (Gabbard & Barton, 1979). Der Sportunterricht enthielt standardisierte Staffelspiele, die zyklisch wiederholt wurden. Nach 50 Minuten Sportunterricht waren die Werte bei Rechenaufgaben signifikant höher als im Prätest. Keine Unterschiede ergaben sich zwischen dem Prätest und allen anderen Messzeitpunkten (20, 30 und 40 Minuten) sowie dem Posttest. Die Autoren schlossen aus ihren Ergebnissen, dass eine höhere Belastungsdauer notwendig ist, um die Leistung in Mathematik zu verbessern, jedoch auch keine der weiteren Bedingungen sich schädlich auf die kognitive Leistungsfähigkeit auswirkt.

In ähnlicher Weise untersuchten McNaughten und Gabbard (1993) die Wirkung einzelner Trainingseinheiten bei Kindern der 6. Klasse, indem sie die Kinder ein Basketballfeld umrunden ließen. Dabei sollte eine Herzfrequenz von 120 bis 145 Schlägen pro Minute eingehalten werden. Das Training wurde während des normalen Sportunterrichts für 20, 30 oder 40 Minuten zu drei verschiedenen Uhrzeiten (dienstags um 8.30 Uhr, mittwochs um 11.50 Uhr und donnerstags um 14.20 Uhr) an drei verschiedenen Tagen durchgeführt. Gleich nach der Trainingseinheit mussten die Versuchsteilnehmer einen 90-sekündigen Mathematiktest durchführen. Die Ergebnisse zeigen, dass um 11.50 Uhr und 14.20 Uhr die direkte Konzentrationsleistung der Schüler, die 30 oder 40 Minuten zügig gegangen waren, höher als die der anderen Schüler mit nur 20-minütiger Laufzeit war. Um 8.30 Uhr gab es jedoch keine Unterschiede in Abhängigkeit der Laufzeit. Da die Autoren jedoch keinen Vergleich der Testleistungen nach dem Training mit einem Prätest (Baseline) vornahmen, ist unklar, inwiefern eine 20-minütige Trainingszeit die kognitive Leistungsfähigkeit beeinflusste oder inwiefern ein anderer Faktor wie Tageszeit oder die Zeit seit der letzten Mahlzeit für die Ergebnisse verantwortlich war.

Die Ergebnisse dieser beiden Studien lassen darauf schließen, dass längere Trainingseinheiten möglicherweise bei Kindern von Vorteil sind. Jedoch konnten andere Studien zeigen, dass Kinder der 4. Klasse schon nach einem 15-minütigen Geh- und Stretching-Training bessere Resultate im Woodcock-Johnson Test (Messung der kognitiven und schulischen Leistungs-

fähigkeit sowie der generellen kognitiven Leistung) im Vergleich zu einer Kontrollgruppe, die keine aeroben Tätigkeiten durchführte, erzielten (Caterino & Polak, 1999). Es muss jedoch auch festgehalten werden, dass Kinder der 2. und 3. Klasse sich in Abhängigkeit von den verschiedenen Interventionen nicht unterschieden. Zusammenfassend waren diese frühen Studien trotz ihrer bahnbrechenden Bemühungen in ihren Ergebnissen inkonsistent, wobei dies vermutlich auf die Unterschiede in der Übungsgestaltung, der Intensität und Dauer ebenso wie auf das Alter der Untersuchungsteilnehmer und die unterschiedlich überprüften Aspekte von Kognition zurückzuführen ist. Dennoch zeigen diese Studien, dass einzelne Trainingseinheiten zu positiven oder zu keinen Veränderungen in der Kognition führen, was darauf schließen lässt, dass körperliche Aktivität zumindest keinen schädlichen Einfluss auf die schulische Leistungsfähigkeit hat.

Neuere Studien fokussieren auf den Effekt unterschiedlicher Trainingsinhalte auf die Kognition. Budde, Voelcker-Rehage, Pietrabyk-Kendziorra, Ribeiro und Tidow (2008) untersuchten während des Sportunterrichts die Effekte eines 10-minütigen Koordinationstrainings im Vergleich zu einer normalen Unterrichtsstunde auf die Konzentration und die Aufmerksamkeit bei 13 bis 16 Jahre alten Jugendlichen. Das Koordinationstraining beinhaltete verschiedene bilaterale Fertigkeiten (z.B. gleichzeitig mit beiden Händen zwei Bällen prellen), die normale Unterrichtsstunde Übungen mit moderater Intensität, jedoch ohne spezifische koordinative Elemente. Konzentration und Aufmerksamkeit wurden mit dem d2-Test nach einer gewöhnlichen Schulstunde (Prä-Test), nach 10-minütigem Koordinationstraining und nach einer Sportstunde (Post-Test) überprüft. Beim d2-Test müssen die Versuchsteilnehmer möglichst viele der mit 2 Strichen markierten „d“s innerhalb einer Kette von „p“s und „d“s durchstreichen und sollen dabei weder Auslassungs- noch Verwechslungsfehler produzieren. Die Ergebnisse zeigten, dass sich die Testleistung nach 10-minütigem Training im Vergleich zur Kontrollbedingung verbessert hat. Darüber hinaus erreichten die Kinder mit Koordinationstraining bessere Werte in Quantität und Qualität bei den d2-Ergebnissen als Kinder, die normalen Sportunterricht durchführten und dies trotz des Umstandes, dass sich die beiden Gruppen nicht hinsichtlich ihrer Trainingsintensität (Herzfrequenz im Mittel ca. 120 Schläge/Minute) und der Trainingsdauer (10 Minuten) unterschieden. Jedoch muss auch angemerkt werden, dass die Reihenfolge der Übungsbedingungen nicht ausgeglichen war. Insofern lassen sich die gefundenen Effekte möglicherweise auch auf Übungs- oder Lerneffekte zurückführen, was insbesondere für den d2-Test hinlänglich bekannt ist. Unabhängig davon werfen diese Ergebnisse neue Fragen hinsichtlich des potenziell

differenziellen Einflusses verschiedener Arten von Trainingsinhalten auf die Kognition bei Kindern auf. Das heißt auch, dass weitere Studien notwendig sind, die die Trainingsinhalte in den Blick nehmen, die nicht ausdauerorientiert sind (z. B. Koordinationstraining), da diese möglicherweise einen unabhängigen und einzigartigen Effekt auf das Gehirn haben. Für diese Forschungsrichtung sprechen Evidenzen aus der tierexperimentellen Forschung. So konnten beispielsweise in Versuchen mit Ratten, die ein Akrobatiktraining absolvierten, spezifische Veränderungen der Gehirnfunktion beobachtet werden (Isaacs, Anderson, Alcantara, Black & Greenough, 1992).

Andere Studien haben sich auf die Effekte einzelner Trainingseinheiten in Bezug auf die Leistung bei Gedächtnistests konzentriert (Pesce, Crova, Cereatti, Casella & Bellucci, 2009). Kinder im Alter von 11 bis 12 Jahren absolvierten nach einem Ausdauerzirkel oder Mannschaftsspielen (Unterschiede in den kognitiven und sozialen Anforderungen) einen Gedächtnistest in der Variante „freier Abruf“. Bei diesem Gedächtnistest wurden die Teilnehmer instruiert, 20 Wörter auswendig zu lernen. 100 Sekunden (unmittelbarer freier Abruf) sowie 720 Sekunden (verzögerter freier Abruf) nach Beendigung der Auswendiglernphase sollten so viele Wörter wie möglich aufgeschrieben werden. Beide Gruppen wurden hinsichtlich Trainingsdauer (ca. 40 Minuten) und der Intensität (Herzfrequenz im Mittel 140 Schläge/Minute) gleich behandelt, nur die Trainingsinhalte unterschieden sich. Unter der Bedingung verzögerter Abruf konnten sich beide Interventionsgruppen an mehr Wörter im Vergleich zum Prätest erinnern. Unter der Bedingung unmittelbarer Abruf konnte sich nur die Gruppe, die an den Mannschaftsspielen teilnahm, an mehr Wörter erinnern.

Dennoch sind die Ergebnisse zu den einzelnen Trainingseffekten und der Gedächtnisleistung nicht eindeutig, da andere Studien zwar positive Auswirkungen auf die kognitive Kontrolle, nicht aber auf das Arbeitsgedächtnis finden konnten (Drollette, Shishido, Pontifex & Hillman, 2012). So führten 9 bis 10-jährige Kinder je eine Aufgabe zur Aufmerksamkeit und zum räumlichen Arbeitsgedächtnis durch, und dies während und nachdem sie auf einem Laufband mit einer moderaten Intensität (60% der max. Herzfrequenz) liefen. Es zeigte sich, dass während der Ausdauerbelastung keine Veränderungen in Aufmerksamkeit oder Gedächtnis erzielt wurden, jedoch ein selektives Ansteigen in der Aufmerksamkeitsaufgabe, nicht aber der Arbeitsgedächtnisaufgabe zu beobachten war (Drollette et al., 2012).

Zusammenfassend lassen diese Ergebnisse vermuten, dass nur spezifische Aspekte des Gedächtnisses (u. a. Kurzzeitgedächtnis) durch einzelne Trainingseinheiten unterstützt werden können. Dies trifft ver-

mutlich noch mehr für Aufgaben zu, die eine kognitive Aktivierung mittels verschiedener kognitiver und sozialer Interaktionen beinhalten. Weiterhin bleiben andere Aspekte des Gedächtnisses (u. a. Arbeitsgedächtnis) von dem vorübergehenden Einfluss von Training auf die Kognition während der Entwicklung unberührt. Es wird deutlich, dass weitere Studien zu den selektiven Effekten auf das Gedächtnis notwendig sind, um diesen Zusammenhang besser zu verstehen.

Trotz der Wahrnehmung eines positiven Zusammenhangs einer einzelnen Trainingseinheit und der Kognition, hat sich dieses Forschungsfeld bisher nicht in dem Sinne etablieren können, dass ein umfassendes Verständnis zu den notwendigen Charakteristiken der Trainingsgestaltung (u. a. Art, Dauer, Intensität) vorliegen würde, um kognitive Vorteile zu erzielen. Es ist auch noch nicht gelungen, eine umfassende Charakterisierung der positiven kognitiven Veränderungen durch eine einzelne Trainingseinheit vorzunehmen. Daher ist deutlich mehr Forschung nötig, um den Zusammenhang einer einzelnen Trainingseinheit und den akuten Veränderungen der Kognition vollständig verstehen zu können. Unser Labor hat begonnen, diese Fragestellung aus einer neuroelektrischen Perspektive zu untersuchen. Anhand einer einzelnen Ausdauertrainingseinheit mit moderater Intensität prüften Hillman et al. (2009b) bei präadoleszenten Kindern sowohl das Ausmaß der Effekte in der Verbesserung der kognitiven Funktion auf grundlagenorientierte (u. a. Labortests) als auch angewandte (u. a. schulische Leistungsfähigkeit) Aspekte der Kognition. Die Ergebnisse zeigen, dass Kinder nach einem 20-minütigen Laufbandtraining mit moderater Intensität (~ 60% der max. Herzfrequenz) im Vergleich zur Ruhebedingung (im Sitzen) eine Verbesserung in der Antwortgenauigkeit bei einer modifizierten Flanker-Aufgabe erzielen, eine selektiv größere P3-Amplitude produzieren, jedoch nur für die Bedingungen, die eine größere kognitive Kontrolle benötigen und letztlich eine bessere Leistung im Lese-Subtest des Wide Range Achievement Test – 3rd edition (Hillman et al., 2009b) erlangen. Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass positive Effekte einer einzelnen Ausdauertrainingseinheit auf Aufmerksamkeitsaspekte der kognitiven Kontrolle bestehen, die die Nutzung von Aufmerksamkeitsressourcen in alters- und übungabhängigen Weise zu erleichtern scheinen. Obwohl die Nachweise nur spärlich sind, zeigen vorläufige Ergebnisse, dass intensive Übungseinheiten die schulische Leistungsfähigkeit verbessern können und daher einen wichtigen Gesichtspunkt für die schulische Praxis sowie das Klassenklima darstellen. Erst kürzlich wurden in unserem Labor die Effekte einzelner Trainingseinheiten auf neurokognitive Tests, Verhaltenstests und schulische Leistungstests repliziert und diese Befunde auf Kinder mit Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivi-

tätsstörung (ADHD) ausgeweitet. Dies lässt vermuten, dass intensive Übungseinheiten auch vorübergehende Effekte bei verschiedenen Populationen während und über den Schulalltag hinaus produzieren können (Pontifex, Saliba, Raine, Picchiatti & Hillman, 2012).

## Zukünftige Forschungsrichtungen

Dieses Forschungsfeld befindet sich noch in den Kinderschuhen, jedoch liegen eine Reihe vielversprechender Möglichkeiten vor, die das Zusammenspiel von Fitness, einzelnen Trainingseinheiten und der kognitiven Gesundheit und der Gehirngesundheit aufdecken könnten. Die Hauptrichtung zukünftiger Studien sollte erstens darin liegen, das Verständnis der relevanten neuronalen Strukturen und deren funktionalen Beziehungen, die den Effekten von Fitness und körperlicher Aktivität auf die Kognition zugrunde liegen, zu verbessern. Solche Untersuchungen würden nicht nur erklären, wie das Gehirn auf Veränderungen von Aktivitätsmustern bzw. Zugewinnen in der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit reagiert, sondern auch warum diese Lebensstilfaktoren die alltägliche kognitive Gesundheit und Funktionsfähigkeit positiv beeinflussen könnten. Zu diesem Zweck sollte eine breite Palette an kognitiven Funktionen untersucht werden, die nicht nur einzelne Aspekte der kognitiven Kontrolle, sondern auch relevante Aspekte von Wahrnehmung und Gedächtnis mit einbezieht. Ein besseres Verständnis darüber, wie die grundlegenden Veränderungen der Gehirnfunktionen und der Fitness die Kognitionen, wie die schulische Leistungsfähigkeit beeinflussen, könnte dazu führen, die entsprechenden Forschungsergebnisse auch in das Leben der Kinder zu integrieren. Erste Versuche, neuroelektrische Biomarker für die Leseleistung und die mathematische Leistung zu identifizieren (Hillman et al., 2012), verdeutlichen, dass weitere Studien mit bildgebenden Verfahren zu schulischen Leistungen und darüber wie Fitness diese Beziehung gestaltet, durchgeführt werden müssen. Darüber hinaus gibt es eine steigende Anzahl an Publikationen zu der Frage, wie Training auf zellulärer und molekularer Ebene bei Tieren wirkt (Vaynman & Gomez-Pinilla, 2006). Jedoch fehlt es an Studien, die diese Effekte am Menschen, insbesondere bei Kindern und Jugendlichen in der Entwicklung, zeigen. In der letzten Zeit sind einige richtungweisende Studien veröffentlicht worden (z. B. Pereira et al., 2007). Jedoch sollten größere Anstrengungen unternommen werden, die zellulären und molekularen Mechanismen zu untersuchen, um den Zusammenhang von Fitness, Gehirn und Kognition erklären zu können. Entscheidend ist ein besseres Verständnis darüber, wie Fitness und körperliche Aktivität die Entwicklung von Kindern beeinflusst. Die Wissenschaft hat bis heute die Ent-

wicklung als einheitliches Konstrukt behandelt, und nur wenig Aufmerksamkeit auf differentielle Effekte, die möglicherweise während verschiedener Punkte in der Entwicklung auftreten, gelegt. So ist es möglich, dass sensitive Phasen in der Entwicklung auftreten, in denen körperliche Aktivität und Fitness stärkere Effekte auf die Reifung des Gehirns haben und damit wiederum auf die kognitive Gesundheit und Funktion. Die zukünftige Forschung muss vergleichende Studien während verschiedener Phasen der Entwicklung und letztlich Längsschnittstudien durchführen, um das Potenzial für die differenziellen Effekte von Fitness auf die kognitive Entwicklung zu bestimmen.

## Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit dem vorliegenden Manuskript spannende neue Forschungsschwerpunkte aufgezeigt wurden, die die Beziehung von Fitness, Gehirngesundheit, Kognition und schulischer Leistungsfähigkeit bei Kindern in den Fokus genommen haben. Trotz der Tatsache, dass diese Forschungsrichtung noch in ihren Kinderschuhen steckt, haben sich robuste Ergebnisse zu den selektiven Effekten von Fitness auf Gehirnstruktur und -funktion als auch auf verhaltensorientierte Kognitionstests herauskristallisiert. In ähnlicher Weise haben andere Forschungsanstrengungen die Effekte einzelner Trainingseinheiten auf die kognitiven Fähigkeiten und die Gehirnfunktionen sowie die schulische Leistungsfähigkeit herausgearbeitet. Die Konsequenzen dieser Forschung könnten zu einer Verbesserung der kognitiven Fähigkeiten und Gehirnfunktionen, sowie einer Erhöhung der effektiven Funktionalität und der schulischen Leistungen von Personen während ihrer Reifung führen, was wiederum eine gesunde Basis für die weitere Entwicklung über die Lebensspanne bieten könnte. Solche Daten sind in einer Welt, in der Kinder zunehmend Zeit im Sitzen verbringen und nur noch eine geringe Fitness besitzen, von besonderer Bedeutung, um diesem schwerwiegenden, gesellschaftlichen Gesundheitsproblem zu begegnen.

## Literatur

- Aron, A. R., Poldrack, R. A. & Wise, S. P. (2009). Cognition: Basal ganglia role. *Encyclopedia of Neuroscience*, 2, 1069–1077.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S. & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108, 624–652.
- Buck, S. M., Hillman, C. H. & Castelli, D. M. (2008). The relation of aerobic fitness to stroop task performance in preadolescent children. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40, 166–172.

- Budde, H., Voelcker-Rehage, C., Pietrabyk-Kendziorra, S., Ribeiro, P. & Tidow, G. (2008). Acute coordinative exercise improves attentional performance in adolescents. *Neuroscience Letters*, 441, 219–223.
- Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D. & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280, 747–749.
- Casey, B. J., Getz, S. & Galvan, A. (2008). The adolescent brain. *Developmental Review*, 28, 62–77.
- Caterino, M. C. & Polak, E. D. (1999). Effects of two types of activity on the performance of second-, third-, and fourth-grade students on a test of concentration. *Perceptual and Motor Skills*, 89, 245–248.
- Chaddock, L., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Kim, J. S., Voss, M. W., VanPatter, M. & Kramer, A. F. (2010a). A neuroimaging investigation of the association between aerobic fitness, hippocampal volume and memory performance in preadolescent children. *Brain Research*, 1358, 172–183.
- Chaddock, L., Erickson, K. I., Prakash, R. S., VanPatter, M., Voss, M. W., Pontifex, M. B. et al. (2010b). Basal ganglia volume is associated aerobic fitness in preadolescent children. *Developmental Neuroscience*, 32, 249–256.
- Chaddock, L., Hillman, C. H., Buck, S. M. & Cohen, N. J. (2011). Aerobic fitness and executive control of relational memory in preadolescent children. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43, 344–349.
- Cohen, N. J. & Eichenbaum, H. (1993). *Memory, amnesia, and the hippocampal system*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Cohen, N. J., Ryan, J., Hunt, C., Romine, L., Wszalek, T. & Nash, C. (1999). Hippocampal system and declarative (relational) memory: Summarizing the data from functional neuroimaging studies. *Hippocampus*, 9, 83–98.
- Colcombe, S. & Kramer, A. F. (2003). Fitness effects on the cognitive function of older adults: A meta-analytic study. *Psychological Science*, 14, 125–130.
- Davis, C. L., Tomporowski, P. D., McDowell, J. E., Austin, B. P., Miller, P. H., Yanasak, N. E. et al. (2011). Exercise improves executive function and achievement and alters activation in overweight children: A randomized, controlled trial. *Health Psychology*, 30, 91–98.
- Dehaene, S., Posner, M. I. & Tucker, D. M. (1994). Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 5, 303–305.
- Donchin, E. (1981). Presidential address, 1980. Surprise! Surprise? *Psychophysiology*, 18, 493–513.
- Donchin, E. & Coles, M. G. H. (1988). Is the P3 component a manifestation of context updating? *Brain Behavioral Science*, 11, 357–374.
- Drollette, E. S., Shishido, T., Pontifex, M. B. & Hillman, C. H. (2012). Maintenance of cognitive control during and after walking in preadolescent children. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44, 2017–2024.
- Duncan-Johnson, C. C. (1981). Young Psychophysiology Award address, 1980. P300 latency: A new metric of information processing. *Psychophysiology*, 18, 207–215.
- Etnier, J. L. & Chang, Y.-K. (2009). The effect of physical activity on executive function: A brief commentary on definitions, measurement issues, and the current state of the literature. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 31, 469–483.
- Erickson, K. I., Prakash, R. S., Voss, M. W., Chaddock, L., Hu, L., Morris, K. S. & Kramer, A. F. (2009). Aerobic fitness is associated with hippocampal volume in elderly humans. *Hippocampus*, 19, 1030–1039.
- Fontaine, K. R., Redden, D. T., Wang, C., Westfall, A. O. & Allison, D. B. (2003). Years of life lost due to obesity. *Journal of the American Medical Association*, 289, 187–193.
- Gabbard, C. & Barton, J. (1979). Effects of physical activity on mathematical computation among young children. *Journal of Physiology*, 103, 287–288.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E. & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 4, 385–390.
- Hillman, C. H., Buck, S. M., Themanson, J. R., Pontifex, M. B. & Castelli, D. (2009a). Aerobic fitness and cognitive development: Event-related brain potential and task performance indices of executive control in preadolescent children. *Developmental Psychology*, 45, 114–129.
- Hillman, C. H., Castelli, D. M. & Buck, S. M. (2005). Aerobic fitness and neurocognitive function in healthy preadolescent children. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37, 1967–1974.
- Hillman, C. H., Erickson, K. I. & Kramer, A. F. (2008). Be smart, exercise your heart: exercise effects on brain and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 9, 58–65.
- Hillman, C. H., Pontifex, M. B., Motl, R. W., O'Leary, K. C., Johnson, C. R., Scudder, M. R. & Castelli, D. M. (2012). From ERPs to academics. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2S, S90–S98.
- Hillman, C. H., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Castelli, D. M., Hall, E. E. & Kramer, A. F. (2009b). The Effect of acute treadmill walking on cognitive control and academic achievement in preadolescent children. *Neuroscience*, 159, 1044–1054.
- Holroyd, C. B. & Coles, M. G. H. (2002). The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological Science*, 109, 679–709.
- Ilan, A. B. & Polich, J. (1999). P300 and response time from a manual Stroop task. *Clinical Neurophysiology*, 110, 367–373.
- Isaacs, K. R., Anderson, B. J., Alcantara, A. A., Black, J. E. & Greenough, W. T. (1992). Exercise and the brain: Angiogenesis in the adult rat cerebellum after vigorous physical activity and motor skill learning. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 12, 110–119.
- Kutas, M., McCarthy, G. & Donchin, E. (1977). Augmenting mental chronometry: The P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science*, 197, 792–795.
- Lambourne, K. & Tomporowski, P. (2010). The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: a meta-regression analysis. *Brain Research*, 1341, 12–24.
- Magliero, A., Bashore, T. R., Coles, M. G. H. & Donchin, E. (1984). On the dependence of P300 latency on stimulus evaluation processes. *Psychophysiology*, 21, 171–186.
- McNaughten, D. & Gabbard, C. (1993). Physical exertion and immediate mental performance of sixth-grade children. *Perceptual and Motor Skills*, 77, 1155–1159.
- Miltner, W. H., Lemke, U., Weiss, T., Holroyd, C., Scheffers, M. K. & Coles, M. G. H. (2003). Implementation of error-processing in the human anterior cingulate cortex: A source analysis of the magnetic equivalent of the error-related negativity. *Biological Psychology*, 64, 157–166.
- Neeper, S. A., Gomez-Pinilla, F., Choi, J. & Cotman, C. W. (1995). Exercise and brain neurotrophins. *Nature*, 373 (6510), 109.

- Ng, S. W. & Popkin, B. M. (2012). Time use and physical activity: A shift away from movement across the globe. *Obesity Reviews*, 13, 659–680.
- Olshansky, S. J., Passaro, D. J., Hershov, R. C., Layden, J., Carnes, B. A., Brody, J. et al. (2005). A potential decline in life expectancy in the United States in the 21<sup>st</sup> century. *The New England Journal of Medicine*, 352, 1138–1145.
- Pereira, A. C., Huddleston, D. E., Brickman, A. M., Sosunova, A. A., Hen, R., McKhann, G. M. et al. (2007). An in vivo correlate of exercise-induced neurogenesis in the adult dentate gyrus. *Proceedings of the National Academy of Science*, 104, 5638–5643.
- Pesce, C., Crova, C., Cereatti, L., Casella, R. & Bellucci, M. (2009). Physical activity and mental performance in preadolescents: Effects of acute exercise on free-recall memory. *Mental Health and Physical Activity*, 2, 16–22.
- Polich, J. (1987). Task difficulty, probability and inter-stimulus interval as determinants of P300 from auditory stimuli. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 63, 251–259.
- Polich, J. & Heine, M. R. D. (1996). P3 topography and modality effects from a single-stimulus paradigm. *Psychophysiology*, 33, 747–752.
- Pontifex, M. B., Raine, L. B., Johnson, C. R., Chaddock, L., Voss, M. W., Cohen, N. J. et al. (2011). Cardiorespiratory fitness and the flexible modulation of cognitive control in preadolescent children. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23, 1332–1345.
- Pontifex, M. B., Saliba, B. J., Raine, L. B., Picchietti, D. L. & Hillman, C. H. (2012). Exercise improves behavioral, neurophysiologic, and scholastic performance in children with ADHD. *The Journal of Pediatrics*. doi 10.1016/j.jpeds.2012.08.036.
- Sibley, B. A. & Etnier, J. L. (2003). The relationship between physical activity and cognition in children: A meta-analysis. *Pediatric Exercise Science*, 15, 243–256.
- Tomporowski, P. D. (2003). Cognitive and behavioral responses to acute exercise in youths: A review. *Pediatric Exercise Science*, 15, 348–359.
- Tomporowski, P. D., Davis, C. L., Lambourne, K., Gregoski, M. & Tkacz, J. (2008). Task switching in overweight children: Effects of acute exercise and age. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 30, 497–511.
- U.S. National Center for Education Statistics. *Statistical Abstract of the United States: 2011*. Zugriff am 30. Januar 2012 unter <http://www.census.gov/compendia/statab/>.
- van Praag, H., Christie, B. R., Sejnowski, T. J. & Gage, F. H. (1999). Running enhances neurogenesis, learning, and long-term potentiation in mice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96, 13427–13431.
- Vaynman, S. & Gomez-Pinilla, F. (2006). Revenge of the "sit": How lifestyle impacts neuronal and cognitive health through molecular systems that interface energy metabolism with neuronal plasticity. *Journal of Neuroscience Research*, 84, 699–715.
- Yeung, N., Botvinick, M. M. & Cohen, J. D. (2004). The neural basis of error detection: Conflict monitoring and the error-related negativity. *Psychological Review*, 111, 931–959.

Charles H. Hillman

---

Department of Kinesiology & Community Health  
317 Louise Freer Hall, MC-052  
906 South Goodwin Avenue  
University of Illinois  
Urbana, IL 61801  
USA  
E-Mail: [chhillma@illinois.edu](mailto:chhillma@illinois.edu)